第 38 卷第 5 期 2018 年 3 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.5
Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701220184
段亚锋,王克林,冯达,吴敏,张伟,陈洪松.典型喀斯特小流域土壤有机碳和全氮空间格局变化及其对退耕还林还草的响应.生态学报,2018,38(5):1560-1568.
Duan Y F, Wang K L, Feng D, Wu M, Zhang W, Chen H S. Response of the spatial pattern of soil organic carbon and total nitrogen to vegetation restoration in a typical small karst catchment. Acta Ecologica Sinica,2018,38(5):1560-1568.

典型喀斯特小流域土壤有机碳和全氮空间格局变化及其对退耕还林还草的响应

段亚锋[1,2,4],王克林[2,3,*],冯 达[5],吴 敏[2,3],张 伟[2,3],陈洪松[2,3]
1 湖南农业大学,长沙 410125
2 中国科学院亚热带农业生态研究所,亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125
3 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,环江 547100
4 长沙市环境监测中心站,长沙 410000
5 湖南省测绘科技研究所,长沙 410007

摘要:基于定点回顾实验设计,通过对比分析 2005 年初(退耕还林还草初期)和 2014 年底典型喀斯特峰丛洼地小流域土壤碳氮格局变化,探讨石漠化治理工程实施后,植被恢复对土壤碳氮积累和碳氮空间格局的影响。研究结果发现:退耕还林还草 10a 后,示范区土壤有机碳(SOC)含量显著增加 1.3g/kg,但土壤全氮含量无显著变化;就空间格局而言,退耕还林还草初期土壤碳氮高值聚类区主要分布在坡脚旱地和荒地(荒草)类型区,退耕还林还草 10a 后其高值聚类区主要分布在荒地(灌丛和荒草)类型区,而 10a 前后土壤碳氮的低值聚类区始终分布在洼地旱地类型区;2005 年和 2014 年土壤有机碳半变异函数的拟合模型相同,均为球状模型,在退耕还林还草 10a 后空间异质性增强,土壤有机碳的空间格局受土壤母质和植被结构的影响增强;而土壤全氮半变异函数的拟合模型不同,由指数模型变为球状模型,在退耕还林还草 10a 后空间异质性减弱,土壤全氮的空间格局受随机因素影响增强。研究结果对石漠化区域土地利用结构的优化调整具有重要的科学参考和实践指导意义。
关键词:喀斯特;土壤有机碳;土壤全氮;空间格局;退耕还林还草

Response of the spatial pattern of soil organic carbon and total nitrogen to vegetation restoration in a typical small karst catchment

DUAN Yafeng[1,2,4], WANG Kelin[2,3,*], FENG Da[5], WU Min[2,3], ZHANG Wei[2,3], CHEN Hongsong[2,3]
1 *Hunan Agriculture University, Changsha* 410125, *China*
2 *Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*
3 *Huanjiang Research and Observation Station for Karst Ecosystmes, Huanjiang* 547100, *China*
4 *Environmental Monitoring Stations of Changsha, Changsha* 410000, *China*
5 *The Surveying and Mapping Research Bureau, Changsha* 410007, *China*

Abstract: The spatial patterns of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) are the important components of the co-evolution mechanisms of vegetation and soil nutrient. However, the changes occurring in these spatial patterns during the process of vegetation restoration are poorly documented, especially in southwest China, a region suffering from severe land degradation. Based on soil sampling at the fixed points, we compared the spatial pattern changes of SOC and TN from 2005 (in initial stages of restoration) to 2014 in a typical small karst catchment undergoing rock desertification control for 10

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502400);"973"计划项目课题(2015CB452703);国家自然科学基金项目(31270555,41471445)
收稿日期:2017-01-22; **网络出版日期**:2017-11-21
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: kelin@ isa.ac.cn

years. The spatial pattern was analyzed using the grid sampling method (20m×20m space) with which we collected 528 and 504 samples in 2005 and 2014, respectively. The one-way analysis of variance (ANOVA) comparison showed that the average SOC values in 2014 (18.6g/kg) were significantly higher than those in 2005 (16.5g/kg), but the average TN values showed no significant change after 10 years. The cluster analysis suggested that the high-value clustering points of SOC and TN were changed from the dry land at the toe of slope and abandoned land in 2005 to abandoned land in 2014. Conversely, the low-value clustering points were always located on the dry land at the center of depression in the past decade. The estimation of the spatial pattern of the studied SOC and TN were performed by the geostatistical analyses using semivariograms to determine the average variance between the samples collected (semivariance) at increasing distances from one another. The results showed the semivariograms of SOC were both fitted to a spherical model between 2005 and 2014. However, the exponential model of TN turned into the spherical model following the vegetation restoration after 10 years. The sill and range values of the semivariogram functions for SOC were greater in 2014 than those in 2005, but shorter for TN. We found that the process of vegetation restoration could lead to an increase in the spatial heterogeneity and patches for SOC, but a decrease in the spatial heterogeneity and patches for TN. This indicated that the influence of parent material and the pattern of vegetation on SOC and random factors on TN were growing increasingly during vegetation restoration in the typical karst catchment. We conclude that afforestation increased both the SOC content and its spatial heterogeneity, but slightly changed the TN content and decreased its spatial heterogeneity after ecosystem restoration for 10 years in the karst areas of southwest China. Moreover, the native vegetation and the cultivated land transformed to native vegetation were the high-value clustering points at the study catchment during 2005—2014. In addition, the human disturbance intensity is an important factor controlling the low-value clustering points in the past decade. Our findings could provide the scientific basis for determining the optimal land use structure and sustainable restoration of ecosystem.

Key Words: Karst; soil organic carbon; soil nitrogen; spatial heterogeneity; vegetation restoration

受植被类型和其他环境因素影响,土壤养分在空间上的分布受多种物理过程、化学过程和生物过程的综合影响,呈现出强烈的空间异质性[1-3]。土壤养分的空间格局是这一系列生态过程综合作用的结果[4],但以往针对土壤养分空间格局的研究主要集中探明测量尺度内不同养分元素的空间格局及影响因素。如从大范围尺度上讲,中国和爱尔兰 SOC 空间分布与区域降水量、海拔及用地类型等密切相关,其高值聚类区与泥炭土空间分布基本一致[5-7];从小范围尺度上来说,黄土高原小流域尺度上土壤碳密度分布格局主要与土地利用类型密切相关,灌木林最高,撂荒地、果园、耕地次之,人工草地最低[8],在生态系统尺度内,土壤有机碳空间格局主要受植被群落结构和干扰影响[9]。但部分研究表明植被生产力的恢复和土壤养分的恢复之间往往具有时滞性,如在美国南部地区的研究发现,弃耕地经过 30a 的演替,生态系统几乎所有的碳积累都由地表生物量贡献,而土壤有机碳库的变化很小,也有研究表明在植被恢复最初的 10a,土壤有机碳储量甚至低于恢复前水平[10-11]。这说明只探讨某一时段内土壤碳氮的空间格局及其影响因素并不能真实反映生态过程(植被演替、土地利用类型转变等)对土壤碳氮格局的影响。

20 世纪 90 年代后期以来中国国家重大生态工程的实施(退耕还林、封山育林、生态移民与石漠化治理等),极大地促进了植被恢复,西南喀斯特区域植被覆盖增加[12],植被生产力[13-15]和生态系统服务[16-17]正逐步提升。但在该区研究中缺乏植被重建对土壤养分格局和维持功能影响的探讨。如以往研究中探讨典型喀斯特区域不同土地利用类型下土壤养分空间格局差异一般采用空间代时间的方法,以原森林、撂荒地或耕地为对照[18-20],以期说明植被恢复对土壤养分空间格局的影响。但该地区土壤环境较非喀斯特地区更为复杂,具有微地貌复杂多样、土壤浅薄、分布不连续、基岩广泛出露等基本特征,其研究样区环境之间的差异会影响时序分析上(空间代时间)的精确性,分析结果可能存在误差。此外,此类研究中不同土地利用类型下利用历史不同也会影响研究结果的科学性。这要求我们在设计实验时尽可能保证样区环境和土地利用历史的一致

性,采用定点回顾实验设计的方法,减小因样区环境差异和土地利用历史不同而造成分析结果的误差,以期较为真实地反映植被群落恢复这一过程和土壤养分格局变化的相互联系。

峰丛洼地是喀斯特地区最基本也是最典型的地貌单元,在典型的喀斯特峰丛洼地内采用定点回顾实验,对比退耕还林前后土壤碳氮的空间格局变化特征,可了解喀斯特区域土壤碳氮变化对退耕还林还草的响应及其时空演化规律,对进一步探讨该区域土壤碳氮与植被转变的关系具有重要意义,本研究结果以期为因地制宜、针对性地解决退化生态系统恢复各阶段存在的养分限制障碍提供一定的科学依据。

1 研究区域概况

1.1 研究区自然环境概况

研究区为典型喀斯特石漠化治理示范区(古周移民示范区)是一个封闭的峰丛洼地单元,位于广西环江毛南族自治县下南乡西南部(24°50′N,107°55′E)。区内海拔最低点为376m,与最高点高差为440m。属于亚热带季风气候,多年平均气温16.5—20.5℃,多年平均降雨量为1389.1mm,成土母质为石灰岩,土壤交换量和盐基饱和度均高,多为粘质,整个土体与基岩面过渡清晰,平均裸岩率为31.5%[21]。

1.2 示范区土地利用类型变化

退耕还林还草工程实施初期(2005年),研究区土地利用类型以旱地为主,种植面积为17.3hm^2,占总面积的74.5%,牧草(桂牧一号)种植面积为5.0hm^2,占洼地总面积21.5%(图1、表1)。工程实施10a后(2014年)研究区约一半的旱地(10.4hm^2)转化为人工林、牧草、人工林草间种和撂荒,转换面积约占总面积的44.8%。牧草地转为人工林草间种的面积约为3.1hm^2,转换面积约占总面积的13.3%。同时,生态移民工程实施后,由于居民外迁,在缺乏耕作管理的情况下,示范区部分牧草地自然演替为荒草地,此类荒地面积约增加0.2hm^2(图1、表1),其中旱地主要以玉米(*Zea Mays* L.)、大豆(*Glycine max*)、红薯(*Ipomoea batatas*)轮种为主,牧草主要指桂牧一号(*Gui Mu No.1*),人工林优势种为任豆(*Zenia insignis Chun*),荒地主要为白茅(*Imperata cylindrica*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、类芦(*Neyraudia reynaudinana*)等草类和灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、红背山麻杆(*bauhinia brachycarpavar cavaleriei*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)等灌木以及少量菜豆(*Radermachera sinica*)、香椿(*Toona sinensis*)等乔木。

表1 典型喀斯特区域土地利用类型面积变化/hm^2

Table 1 The area change of landuse in typical karst area

年份 Years	总面积 Total area	旱地 Dry land	人工林 Plantation	人工林草间种 Plantation intercropped with forage	牧草 Forage	荒地 Abandoned	果园 Orchard	建筑物 Building
2005	23.2	17.3	0	0	5.0	0.3	0.05	0.5
2014	23.2	6.9	0.6	7.4	3.5	4.2	0.05	0.5

2 研究方法

2.1 采样方法与实验分析

样本点的布设采用规则网格和线形(链形)相结合的方法。如图2所示,在洼地和坡脚采用网格取样,取样间隔20m,共设置样本点528个(2005)和504个(2014)。用全站仪(南方,NTS-302R)和GPS测定并记录每个样本点的位置,并用PVC管标记。分别于2005年1月20日至25日[22]与2014年12月20日至31日进行采样,采样时在每根PVC管周围2m范围内随机采取5—8个0—15cm的表层土壤样本,混合后代表该样点土样。并详细记录该样点的土地利用变化方式、植被类型、耕作制度、岩石出露率(裸岩率)等环境信息,其中裸岩率以样点周围2m×2m范围内岩石出露的面积估算。坡脚的样点记录每个样点的坡度、坡向、土层厚度等信息,其中土层厚度以样点周围2m×2m范围内8—10个点的土层厚度平均值表示。采样结束后,土壤样品

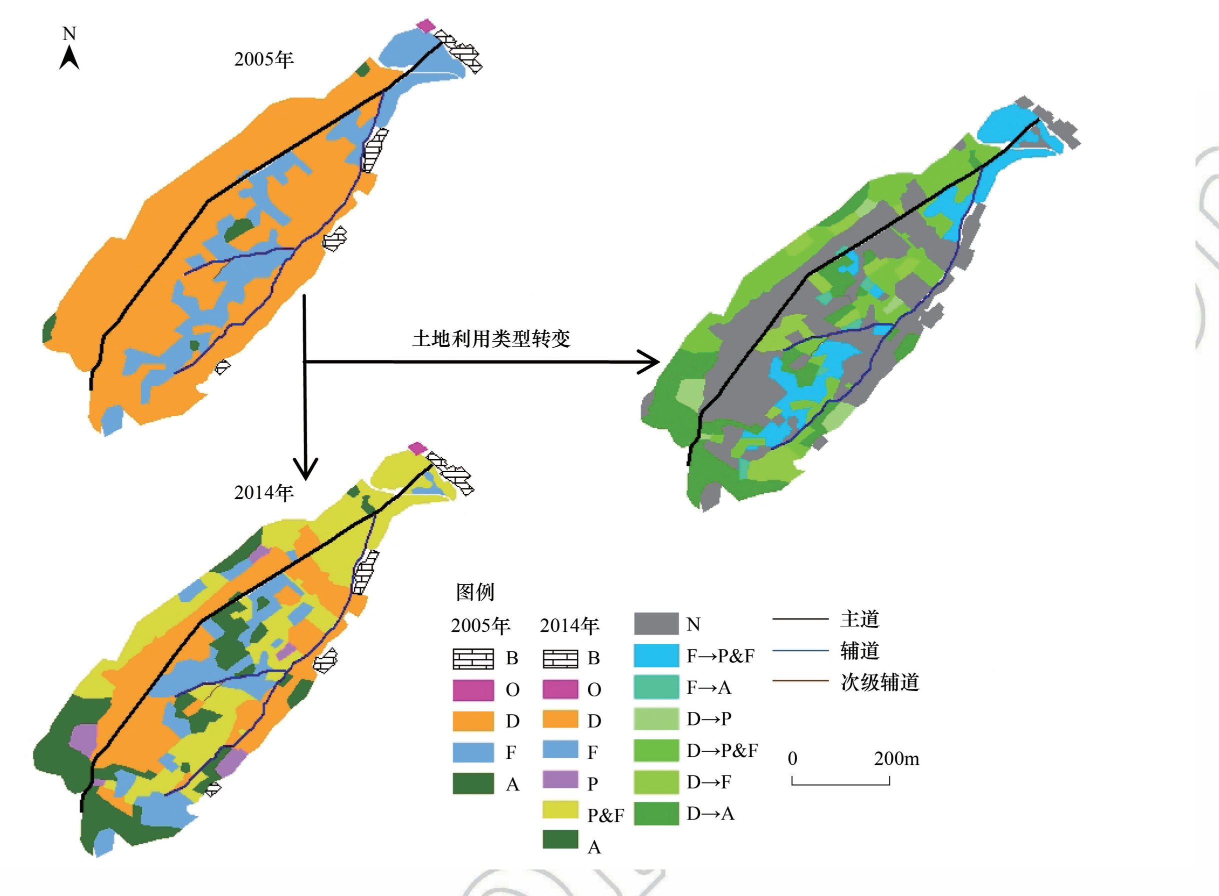


图 1　典型喀斯特区域土地利用类型分布与转变图

Fig.1　Landuse pattern and landuse change in typical karst area

B: 建筑物 building; O: 果园 orchard; D: 旱地 dryland; F: 牧草 forage; A: 荒地 abandoned; P: 人工林 plantation; P&F: 人工林草间种 plantation intercropped with forage; N: 未发生变化 no change; →: 变化 change

及时带回实验室风干过筛,利用相同的实验方法分别测定土壤碳氮,其中土壤有机碳采用重铬酸钾容量法——外加热法(油浴)测定,土壤全氮利用用碳氮仪测定[23]。

2.2　数据处理

本文采用 SPSS 16.0 和 Orgin 8.5 进行数据的经典统计分析, 利用 GS+Version 7.0 进行数据的半变异函数模型拟合,利用 ArcGIS 10.1 进行数据的聚类分析(Anselin local Moran's I)和 Kriging 插值(首先利用 GS+拟合最优的土壤碳氮半变异函数模型,将拟合的参数输入 Kriging 插值的半变异函数模型后插值[24-25]),分析方法运用比较广泛,本文不再介绍。

3　统计结果分析

3.1　描述性统计分析

研究区 2005 年土壤有机碳含量为 6.0—49.4g/kg,均值为 15.5g/kg,2014 年土壤有机碳含量为 6.5—60.3g/kg,均值为 16.8g/kg。2005 年土壤全氮含量约为 0.78—5.98g/kg,均值为 2.00g/kg,2014 年土壤全氮含量为 0.82—5.64g/kg,均值为 2.02g/kg(图 3),退耕还林还草 10a 后洼地土壤有机碳和土壤全氮分别提高了 1.3g/kg与 0.02g/kg,其中退耕还林还草 10a 前后土壤有机碳存在显著性差异。土壤碳氮数据的单样本 K-S 检验结果均小于 5%显著水平,原始数据不符合正态分布(图 3),本文通过对数转换使数据呈现正态分布后进行地统计分析。

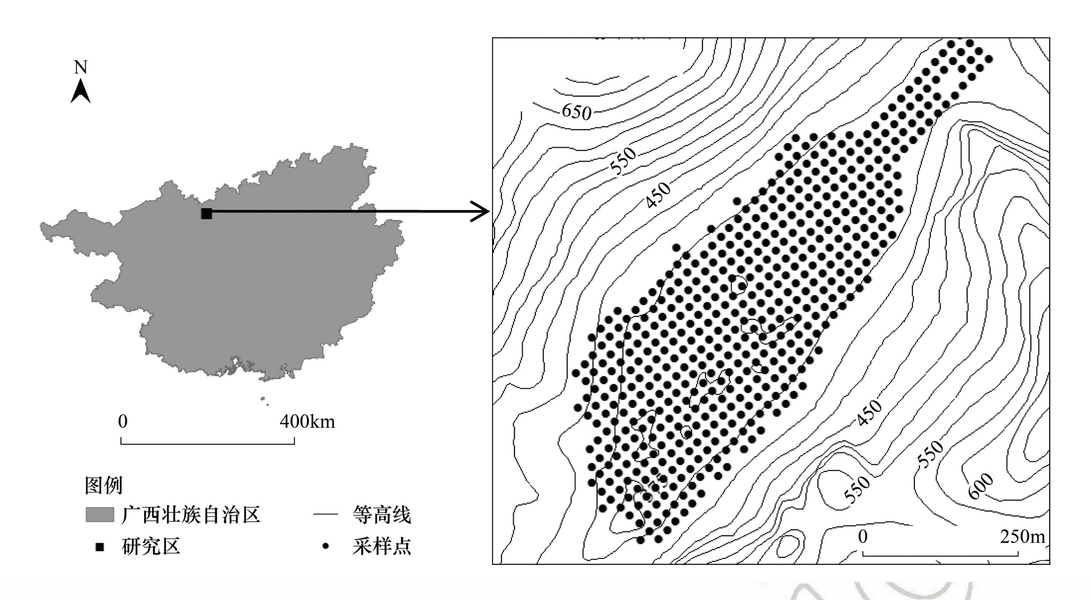


图 2　研究区样地和土壤采样点分布图

Fig.2　The location of sampling area and distribution of soil sampling points

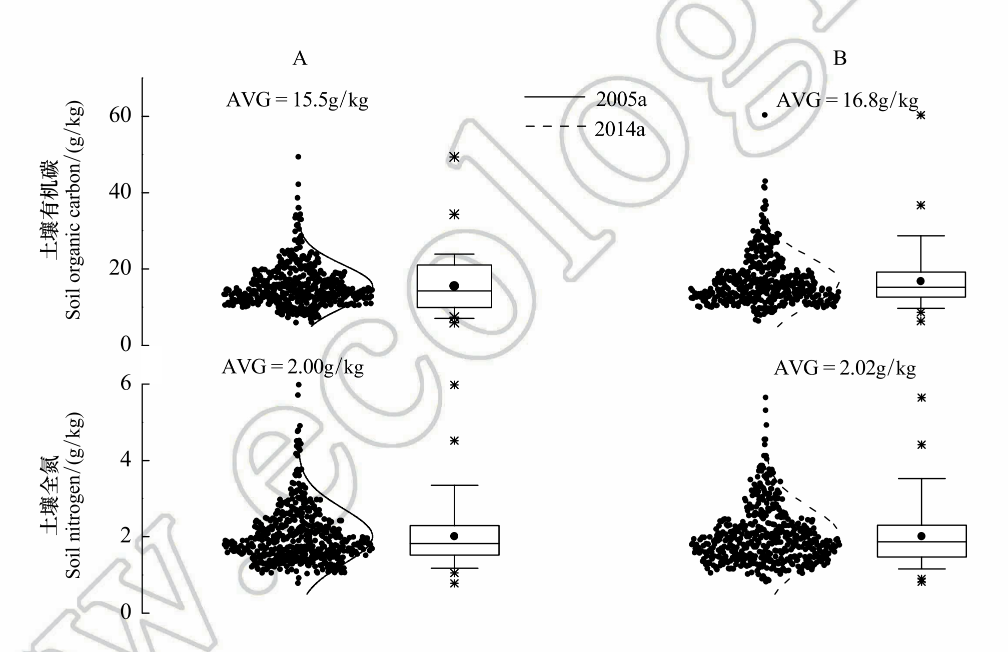


图 3　土壤碳氮描述性统计分析

Fig.3　Descriptive statistics of soil organic carbon and total nitrogen

AVG：均值 average

3.2　土壤有机碳空间聚类分析

退耕还林还草 10a 后土壤碳氮高值聚类区范围扩大，2005 年土壤碳氮的高值聚类区主要分布在坡脚旱地区与荒地（荒草）类型区，2014 年主要分布在荒地（荒草和灌丛）类型区；而退耕还林还草 10a 后土壤有机碳低值聚类区范围缩小，土壤全氮低值聚类区范围分布更为分散，但 2005 年和 2014 年土壤碳氮的低值聚类区一直分布在洼地旱地类型区（图 4）。

3.3　半变异函数结构分析

土壤碳氮理论模型的决定系数均较高（表 2）[24]，说明理论模型能很好的反映研究区土壤碳氮的空间结构特征。具体表现为退耕还林还草 10a 后，土壤有机碳空间结构变化不大，其空间结构模型皆为球状模型（图 5），块基比和变程皆降低（表 2），说明土壤有机碳空间异质性增强；而退耕后土壤全氮空间结构存在变化，其

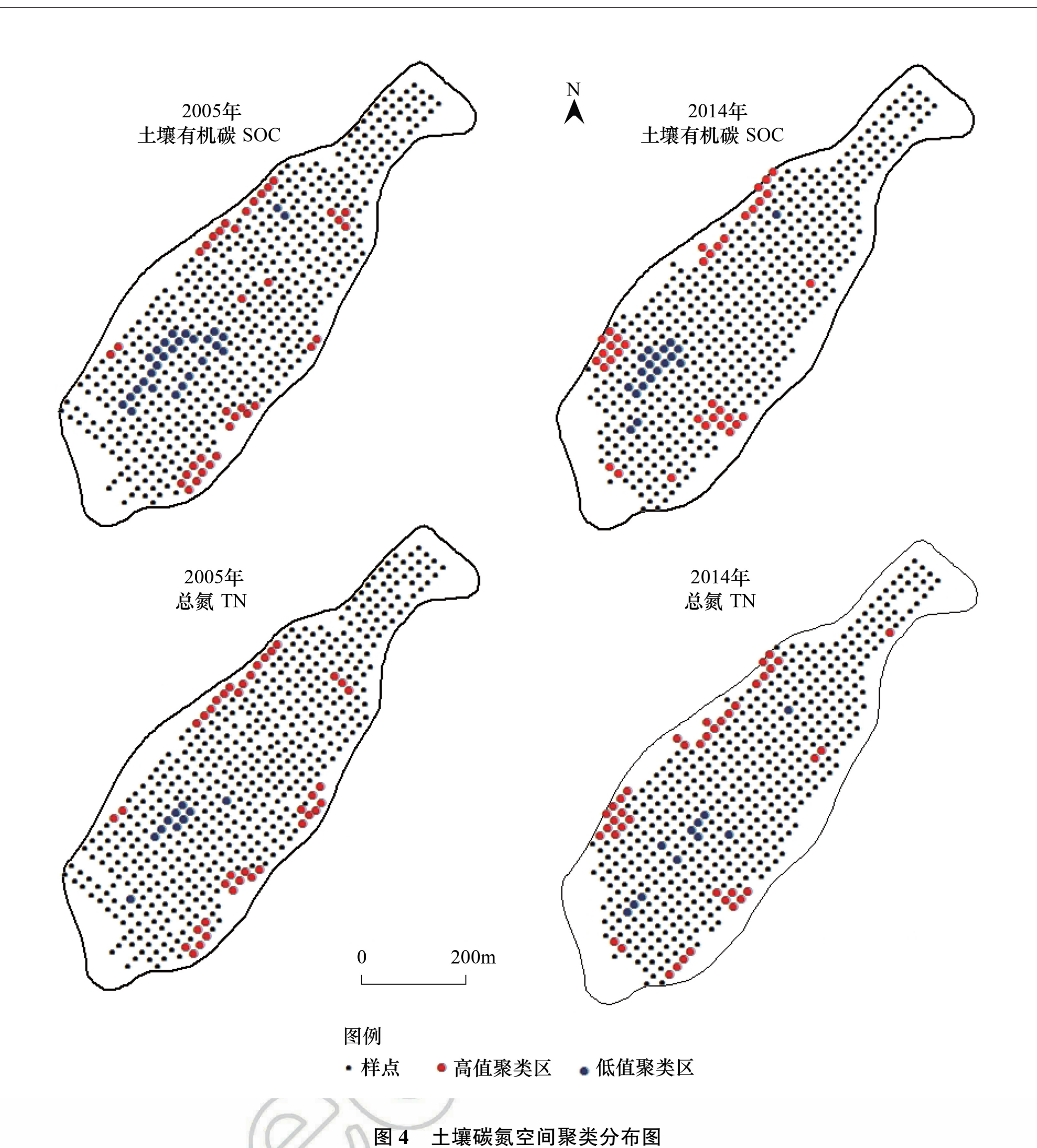


图 4　土壤碳氮空间聚类分布图

Fig.4　Clustering points distribution of soil organic and total nitrogen

理论模型由指数模型转为球状模型(图 5),块基比和变程增大(表 2),由强空间自相关变为中等空间自相关[24],说明土壤全氮空间异质性减弱。土壤碳氮的半变异函数均表现出一定的孔穴效应(图 5)[24],说明研究区土壤碳氮存在周期性变化的特征。

表 2　10a 前后土壤碳氮变异函数理论模型及其结构参数

Table 2　Best-fitted semivariogram model of soil organic carbon and total nitrogen and its structure parameters in a decade

指标 Index	模型类型 Model type	块金值 C_0/ (g^2/g^2)	基台值 C_0+C/ (g^2/g^2)	块金值/基台值 C_0/C_0+C/%	变程 Range/m	R^2
SOC_{2005}	Spherical	0.0088	0.0210	41.9	140	0.896
SOC_{2014}	Spherical	0.0071	0.0218	32.4	111	0.861
TN_{2005}	Exponential	0.00329	0.02018	16.3	111	0.946
TN_{2014}	Spherical	0.00951	0.02242	42.4	121	0.941

3.4　Kriging 空间插值分析

Kriging 空间插值图结果直观地表明研究区退耕还林还草 10a 后土壤有机碳的累积量增加,但土壤全氮的累积增量不明显。从空间分布而言,退耕还林还草 10a 前后研究区洼地中心区域的土壤碳氮含量皆低于坡脚地带,旱地类型区在部分地段内甚至可见负增长,人为恢复类型区的土壤碳氮增量低于自然恢复类型区(图 1、图 6)。

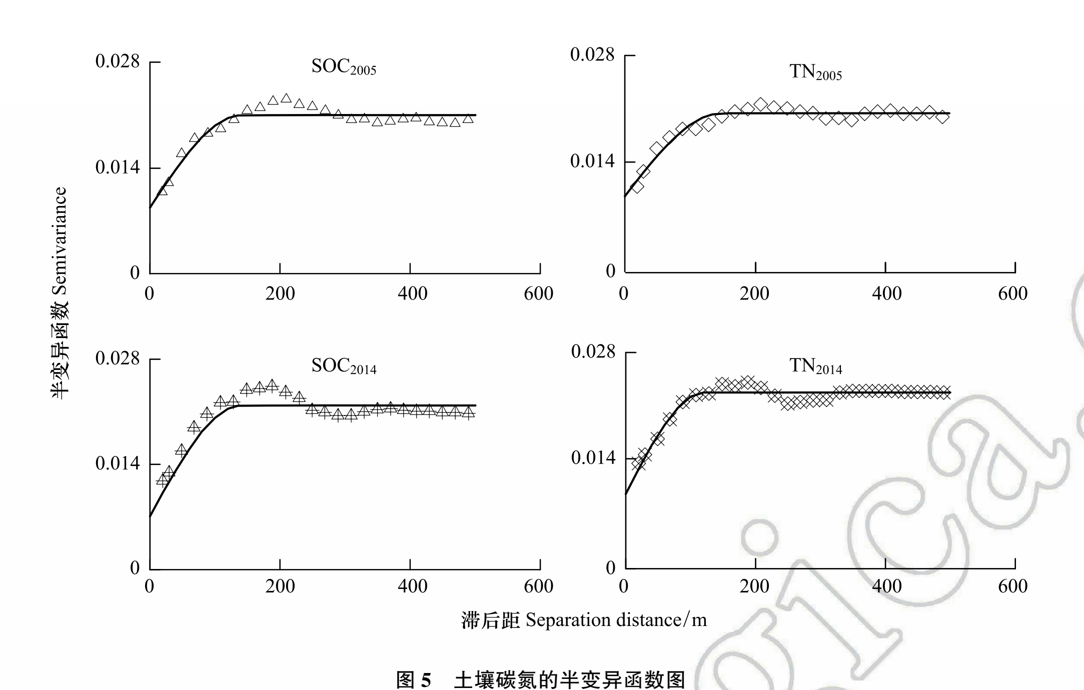


图 5 土壤碳氮的半变异函数图

Fig.5 Semivariograms of soil organic and total nitrogen

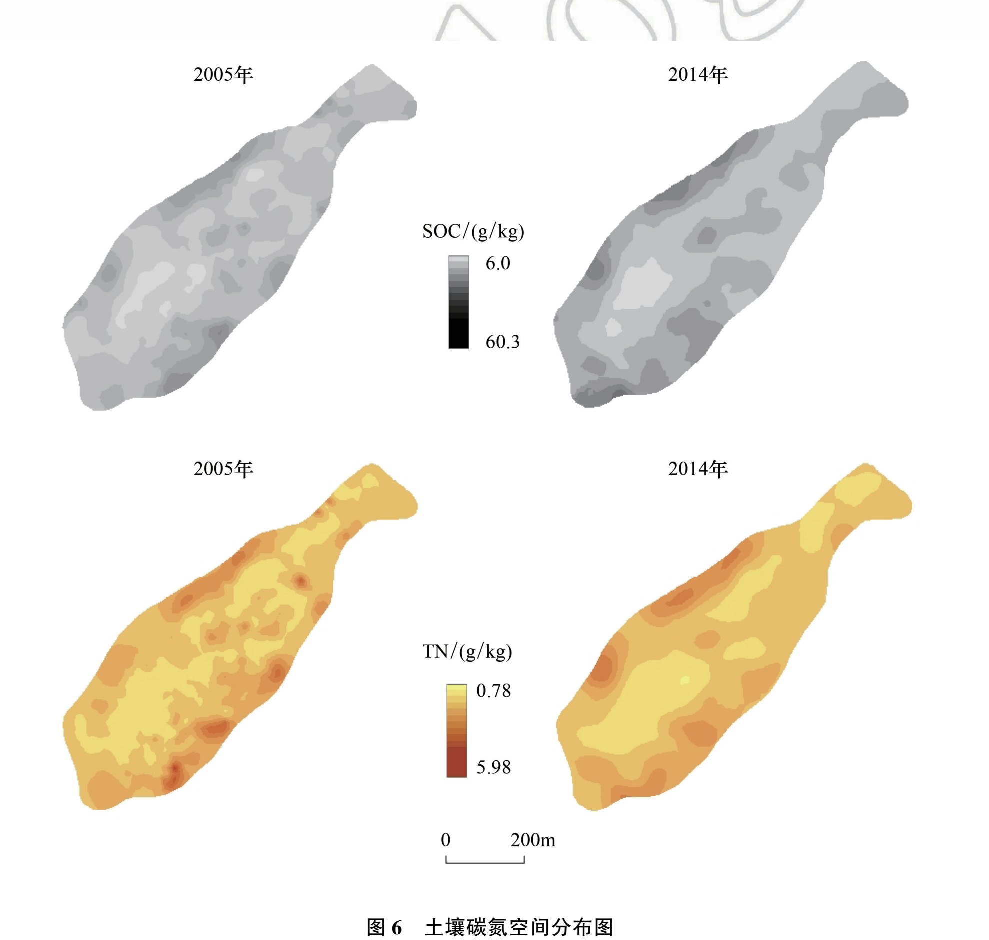


图 6 土壤碳氮空间分布图

Fig.6 Spatial distribution map of soil organic carbon and total nitrogen

4 讨论

研究区土壤有机碳和全氮分别增加了 1.3g/kg 和 0.02g/kg,固碳量为固氮量的 65 倍,但 Deng 等[26]研究表明黄土高原地区退耕还林还草后表层土壤碳氮增量皆较大,其固碳氮比(8—10 倍)也远远低于本研究[26],与本研究结果不一致。这可能由于研究区尚存有部分旱地,且退耕还林还草的年限(10a)小于黄土高原地区(>20a)。Li 等[27]通过 meta 分析 41 篇研究得出退耕还林还草后土壤有机碳增加,而土壤全氮变化不大,此结果与本研究一致。Zhang 等[28]在喀斯特地区研究表明退耕还林还草早期生态系统主要受氮限制,说明植被恢复初期需氮量较大,而土壤全氮存量较少。同时,本文采用定点回顾实验推断植被演替 10a 后土壤有机碳增量明显低于采用空间代时间方法的研究结果[29]。

退耕前大部分土地利用类型以旱地为主,退耕 10a 后旱地比例由 74.6%下降至 29.7%。退耕前旱地土壤时常受到人为扰动,而喀斯特地区土壤主要通过有机结合态 Ca 维持团聚体稳定性,其团聚体结合的 SOC 并不稳定,受到干扰之后极易矿化丢失[30],这可能导致 10a 前后洼地中心部位旱地一直是土壤碳氮的低值聚类区。但在退耕还林还草初期坡脚旱地为土壤碳氮的高值聚类区,这主要由于洼地是示范区单元的汇水区,土壤淋溶较为强烈,SOC 和 N 易于以可溶态向地下迁移,而坡脚尽管坡度大于洼地中心地带,但坡脚岩石出露率较高,多封闭性的小生境发育,土壤养分反而不易侵蚀,这可能导致研究区洼地中心部位土壤碳氮含量低于坡脚[31]。退耕还林还草后,植被和土壤会逐渐耦合协调发展,随着植被群落的正向演替,其凋落物归回量增加[32]。而凋落物的分解是土壤有机质形成、养分积累和 C 平衡的关键环节,其中荒地凋落物全部归还土壤,这会导致退耕前后土壤碳氮的高值聚类区主要分布在荒地,也表明撂荒是固持土壤碳氮较好的退耕模式。同时,人工林在生长初期急需大量养分,导致土壤中养分累积量小,牧草每年被人为移走大量地上生物量,其凋落物归回较少[33],导致人为退耕用地类型区土壤碳氮累积量较自然恢复低,难以形成土壤碳氮高值聚类区。

土壤有机碳的空间异质性增强,说明随机因素对土壤有机碳空间结构的影响减小,其空间分布可能受母质和群落结构的控制。土壤全氮空间异质性减弱,说明随机变异对土壤全氮空间结构的影响增加,全氮空间分布可能受洼地多种小生境和微地貌控制[34],随着植被群落的恢复土壤有机碳累积量较大而土壤全氮变化不大,其植被群落结构的变化对土壤有机碳的空间结构影响也增强,而对土壤全氮空间格局的影响减弱。孔穴效应是指半变异函数在超过一定滞后距范围后呈现出的围绕基台值周期性上下波动的特征[24]。出现孔穴效应表明区域化变量的数学期望在空间上不是常数,而是一个周期函数,这主要是由区域化变量周期性的变化引起。退耕还林还草 10a 前后土壤碳氮皆存在周期性变化的特征,这主要由于研究区洼地东西两侧坡脚相似的地形特征、退耕前皆为旱地以及相似地退耕模式导致的。其中土壤有机碳的孔穴效应减弱,而土壤全氮的孔穴效应变化不大,这可能由于洼地两侧坡面微地貌不相同,同一种退耕模式存在不同的恢复速率。

5 结论

本研究主要通过对比分析典型喀斯特区域土壤碳氮的空间格局变化及其对退耕还林还草的响应,结果表明退耕还林还草工程实施 10a 后显著提高了研究区土壤有机碳的含量,但土壤全氮的累积增量不明显,这主要由于退耕后凋落物归回量增加而植被恢复初期需氮量较大造成的。退耕还林还草 10a 前后,土壤有机碳的空间异质性增强,而土壤全氮的空间异质性减弱,这表明地表植被的变化对土壤有机碳的空间格局影响增强,而对土壤全氮的空间格局影响减弱。工程实施前后,土壤碳氮的低值聚类区一直位于洼地中心部位的旱地,其高值聚类区则主要分布在荒地类型区,说明在典型喀斯特峰丛洼地小流域范围内撂荒是固持土壤碳氮含量和维持土壤生态系统可持续发展的较优退耕模式。以上结果表明,在生态脆弱的西南喀斯特区域,应合理规划区域自然恢复植被和人为恢复植被的面积,以自然恢复为主,合理布局植被群落的空间结构,以调控植被重建区的中后期发展和实现土壤生态功能的整体提升。

参考文献(References):

[1] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011,142: 184-194.
[2] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Su Y R, Zhang J G, Yi A J. The heterogeneity and its influencing factors of soil nutrients in peak-cluster depression areas of karst region. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(3): 322-329.
[3] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4): 184-194.
[4] Liu Y, Lv J S, Zhang B, Bi J. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China. Science of the Total Environment, 2013, 450-451: 108-119.
[5] 于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存. 基于1:100万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2279-2283.
[6] Zhang C S, Tang Y, Xu X L, Kiely G. Towards spatial geochemical modelling: use of geographically weighted regression for mapping soil organic carbon contents in Ireland. Applied Geochemistry, 2011, 26(7): 1239-1248.
[7] Fang X, Xue Z J, Li B C, An S S. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. CATENA, 2012, 88(1): 6-13.
[8] Gao Y, He N P, Yu G R, Chen W L, Wang Q F. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: a case study in China. Ecological Engineering, 2014, 67: 171-181.
[9] Simón N, Montes F, Díaz-Pinés E, Benavides R, Roig S, Rubio A. Spatial distribution of the soil organic carbon pool in a Holm oak *dehesa* in Spain. Plant and Soil, 2013, 366(1/2): 537-549.
[10] Arai H, Tokuchi N, Koba K. Possible mechanisms leading to a delay in carbon stock recovery after land use change. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(5): 1636-1638.
[11] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1/3): 241-257.
[12] Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping. Ecological Engineering, 2013, 54: 245-253.
[13] 杨胜天, 朱启疆. 贵州典型喀斯特环境退化与自然恢复速率. 地理学报, 2000, 55(4): 459-466.
[14] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复评价研究. 林业科学, 2000, 36(6): 12-19.
[15] 刘映良, 薛建辉. 贵州茂兰退化喀斯特森林群落的数量特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(3): 23-27.
[16] 王克林, 岳跃民, 马祖陆, 雷廷武, 李德军, 宋同清. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7098-7102.
[17] Zhang M Y, Zhang C H, Wang K L, Yue Y M, Qi X K, Fan F D. Spatiotemporal variation of Karst ecosystem service values and its correlation with environmental factors in Northwest Guangxi, China. Environmental Management, 2011, 48(5): 933-944.
[18] 袁海伟, 苏以荣, 郑华, 黄道友, 吴金水. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用类型土壤有机碳和氮素分布特征. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1579-1584.
[19] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 杜有新, 王新洲. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤C、N、P含量和空间异质性. 生态学报, 2009, 29(8): 4187-4195.
[20] 叶莹莹, 刘淑娟, 张伟, 舒世燕, 杨珊, 王克林. 喀斯特峰丛洼地植被演替对土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(21): 6974-6982.
[21] 傅伟. 喀斯特环境移民下的坡地土壤环境生态效应研究——以广西环江典型峰丛洼地为例[D]. 长沙: 中国科学院研究生院, 2005: 18-26.
[22] 张伟, 王克林, 陈洪松, 张继光. 典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究. 土壤学报, 2012, 49(3): 601-606.
[23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
[24] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
[25] Webster R, Oliver M A. Geostatistics for Environmental Scientists. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
[26] Deng L, Wang G L, Liu G B, Shangguan Z P. Effects of age and land-use changes on soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment on the Loess Plateau, China. Ecological Engineering, 2016, 90: 105-112.
[27] Li D J, Niu S L, Luo Y Q. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. New Phytologist, 2012, 195(1): 172-181.
[28] Zhang W, Zhao J, Pan F J, Li D J, Chen H S, Wang K L. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China. Plant and Soil, 2015, 391(1/2): 77-91.
[29] 吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 张伟, 王克林, 陈洪松. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(6): 1619-1627.
[30] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 陈洪松, 王克林, 韦国富. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素. 农业工程学报, 2013, 29(1): 93-101.
[31] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
[32] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型. 农业工程学报, 2011, 27(9): 305-310.
[33] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应. 土壤学报, 2011, 48(6): 1219-1226.
[34] 张伟, 王克林, 刘淑娟, 叶莹莹, 潘复静, 何寻阳. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1801-1808.